

文章编号:1673-9469(2022)03-0093-06

DOI:10.3969/j.issn.1673-9469.2022.03.014

地空频率域电磁系统在小煤窑勘查中的应用

崔焕玉¹, 郭培鹏¹, 黎东升^{2,3}, 周海根^{2,3}, 滕飞^{2,3*}

(1. 河北煤炭科学研究院有限公司, 河北 邢台 054000; 2. 吉林大学 仪器科学与电气工程学院, 吉林 长春 130000; 3. 国家地球物理探测仪器工程技术研究中心, 吉林 长春 130000)

摘要: 为实现金谷煤矿小煤窑采掘边界圈定, 采用地空频率域电磁系统开展小煤窑采空积水区的勘查试验工作。实际勘探中设计 124 条南北方向测线, 利用无人机搭载探测天线进行电磁数据的连续采集。通过数据处理与解释, 获得了测区内地下 50~300 m 范围内的视电阻率剖面。根据相对低阻异常的分布情况, 圈围出两个煤窑采空积水区疑似位置。经过与实际煤层采掘资料对比, 圈定的 1 处低阻异常区域下方存在高度充水的采空区。研究结果证明了地空频率域电磁系统在小煤窑勘查工作中的可行性及有效性。

关键词: 地空频率域电磁; 小煤窑; 高分辨率; 勘查

中图分类号: TH763

文献标识码: A

Application of Ground Airborne Frequency Domain Electromagnetic System in Detection of Small Coal Mine

CUI Huanyu¹, GUO Peipeng¹, LI Dongsheng^{2,3}, ZHOU Haigen^{2,3}, TENG Fei^{2,3*}

(1. Hebei Coal Research Institute, Xingtai, Hebei 054000, China; 2. College of Instrumentation & Electrical Engineering, Jilin University, Changchun, Jilin 130000, China; 3. National Geophysical Exploration Equipment Engineering Research Center, Changchun, Jilin 130000, China)

Abstract: In order to realize the boundary delineation of small coal mines in Jingu Coal Mine, the ground airborne frequency domain electromagnetic system is used to carry out for the survey and test work of the small coal mine goafs. In the actual exploration, 124 survey lines in the north-south direction were designed, and the UAV equipped with the detection antenna was used to continuously collect the electromagnetic data. Through data processing and interpretation, the apparent resistivity structure drawing within the range of -50~-300 m underground in the survey area is obtained. According to the relatively low-resistance anomaly distribution, the suspected locations of the two coal mine goaf areas are demarcated. After comparing with the actual coal mining data, there is a goaf with high water filling under the two defined low resistance abnormal areas. The research results prove the feasibility and effectiveness of the ground airborne frequency domain electromagnetic system in the investigation of small coal mines.

Key words: ground airborne frequency domain electromagnetic system; small coal mine; high-resolution; detection

煤炭作为我国经济发展的重要能源支柱, 到 2025 年仍将维持 55% 以上的能源消耗比重^[1-2]。然而浅层资源的开采已经无法满足日益增长的需求, 矿产资源的开发方向已经转向地下深部。早

在 20 世纪 80 年代初期, 在经济发展政策的影响下, 全国各主要矿区出现许多乱采乱挖的小煤窑, 这些小煤窑普遍存在越界开采情况, 同时采掘资料不全或者资料造假严重, 对后期煤矿资源整合

收稿日期: 2022-02-26

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(42174085); 国家自然科学基金资助项目(41904159)

作者简介: 崔焕玉(1983-), 男, 河北保定人, 硕士研究生, 高级工程师, 主要从事勘察地质学方面的研究。

* 通讯作者: 滕飞(1987-), 男, 满族, 吉林永吉人, 硕士研究生, 高级工程师, 主要从事地空电磁勘探技术方面的研究。

以及矿井安全生产带来很大的安全隐患。另一方面小煤窑采空区在地下水发育以及地质松动等条件下,极易造成充水和塌陷等典型地质灾害,不仅影响自然生态环境,而且对民房、道路、以及建筑工程造成严重的安全隐患^[3-5]。因此,开展地下小煤窑的勘查工作对于保障施工安全和环境治理具有重大意义。煤矿开采地区往往地表环境较为复杂,比如悬崖、地表植被茂密区、沼泽地等区域,常规的地面物探方法无法直接进入,近年来,针对此问题,地空电磁法得到了较快的发展。张庆辉等人采用时域电性源地空电磁法对沁水盆地东南地区煤炭采空区及采空积水区进行地球物理勘查,本次勘查表明时域电性源地空电磁探测系统可以实现对煤炭采空区的快速、精确勘查^[6]。王振荣等人采用地空时间域电磁系统在哈拉沟煤矿三盘区附近原小煤矿可能开采范围开展勘查工作,本次探测工作验证了地空时间域电磁系统在煤矿采空区勘查中的有效性,能够为工作面合理布置和采空区治理等提供可靠的地质信息^[7]。侯彦威等人采用地空瞬变电磁对积水采空区进行勘探,将此应用于侏罗系煤田积水采空区的探测中,不仅可以解决地形对施工的影响,而且可以提高工作效率^[8]。

针对煤矿采空区应用的地空电磁法,目前主要是地空时间域方法,收发距较近。本文主要采用地空频率域方法,实现大收发距探测,对于地面人员难进区的探测有一定的优越性^[9-11],该方法具有探测效率高、适用于恶劣地形区域等优点,而且随着系统和算法的不断完善,该技术在深部资源勘查和地质结构探测等方面具有广阔的应用前景^[12-13]。

1 测区地质概况

研究区域地处山西古县金古阳镇白素泽泉

村,井田位于沁水块砾郭道安泽近南北向褶带的中西部边缘地带。区内地层出露较好,自东北向西南由老而新依次出露:石炭系上统太原组、二叠系下统山西组、下石盒子组、二叠系上统上石盒子组,第四系主要分布于山梁、山坡和沟谷^[14]。

测区属暖温带半干旱大陆性季风气候,井田地表水系属黄河流域汾河水系。井田范围内西北部老牛沟发育有一山涧河流,其水量大小随季节变化明显,由北向南流过,注入洪安涧河再向南流至古县县城南后折向西沿洪安涧河在洪洞城南汇入汾河^[14]。

井田总体呈不规则多边形,南北长 3.0 km,东西宽 2.5 km,面积为 8.506 km²。主要可采煤层有 2、9、10、11 号 4 个煤层,各煤层厚度变化相对稳定,变化规律明显,结构简单,煤类单一,煤质变化小。其中,2 号煤层沿沟谷有较大面积的出露和剥蚀,为局部可采煤层;9 号煤层为大部可采煤层;10、11 号煤层为全区稳定可采煤层^[15]。

本次金谷煤矿测区地势起伏较大,同时地表植被较多,地面物探方法不易进入,且勘探工作要求时间周期短,分辨率高,因此选用对低阻反映灵敏,且受地形影响小、抗干扰能力强的地空频率域电磁法进行勘探。

2 地空频率域电磁探测方法原理

地空频率域电磁法(Ground Airborne Frequency Domain Electromagnetic Method, GAFDEM),对地下低阻目标体具有较高的探测灵敏度,其工作原理如图 1 所示,在地面布置电性发射源,同时在空中采用无人机搭载探测线圈,获取垂直磁场分量^[16]。地空频率域电磁探测法与地面可控源电磁法类似,系统的工作区域可划分为远区和非远区(也叫作过渡区和近区)。远区是指发射源产生

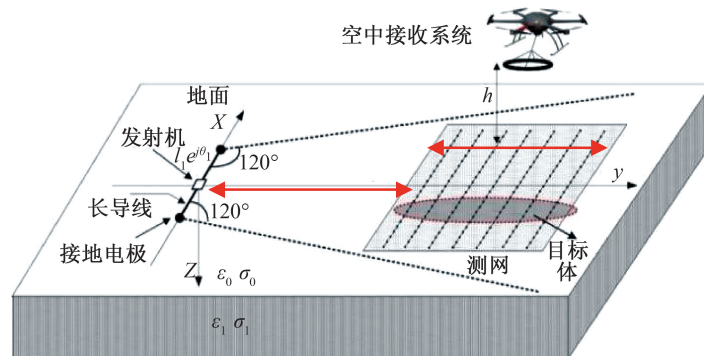


图 1 地空频率域电磁法工作原理示意图

Fig. 1 Diagram for working principle of ground airborne frequency domain electromagnetic method

的电磁波近似垂直入射到地面的近似平面波区。在该区域内,电磁探测方法遵循频率测深原则,即电磁波的趋肤深度只跟频率和地电模型有关,而不随收发距变化。此时,可依据趋肤深度公式设计系统观测方案,即系统发射频率越低,探测深度越大。在非远区,该探测方法也能够某特定测点获得最大的电阻率灵敏度。

地空频率域探测方法一般观测的频率范围为 10 Hz 到 10 000 Hz,其理论勘探深度大约在 2 km 左右^[17]。而实际上受发射功率限制,同时由于接收机是悬吊于飞行器下方观测,其低频运动噪声会覆盖一定范围的低频有效信号,对观测深度和范围造成较大影响。探测深度的估算要视其可解释的最低频率决定,常规条件下(30 kW 发射功率)能够保证接收系统获得 10 Hz 以上,10 km 以内收发距的信号。

当电源布置在地面上,电线长度为 L ,电偶极源中的电流幅值为 I ,接收感应线圈放置在高度为 $|z|$ 的空中 ($z < 0$), R_x 处的感应磁场 B_z 可计算为

$$B_z = \frac{\mu_0 I L}{4\pi R} \int_0^\infty (1 + r_{TE}) e^{u_0 r} \frac{\lambda^2}{\mu_0} J_1(\lambda R) d\lambda \quad (1)$$

式中: $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} \text{H/m}$, $R = [x^2 + y^2]^{\frac{1}{2}}$, r_{TE} 是与地层电阻率和厚度有关的反射系数, $\mu_0 = (\lambda^2 - k_0^2)^{\frac{1}{2}}$, k_0 是空气中波数, λ 是积分变量, J_1 为第一类的一阶贝塞尔函数。通过测量不同频率下空中特定位置的磁场信号,能够实现对于地下空间不同深度电阻率结构的探测。

3 地空频率域电磁探测数据数据采集、处理与解释

3.1 地空频率域电磁探测数据采集

对于金谷北区煤窑的探测选用 JL-GAEM 型多功能地空电磁探测系统,包括地面发射系统和机载接收系统两部分。地面发射系统使用电源车,电源车内部集成包括发电机等全部发射系统模块,发射系统通过编码,可实现频率域模式的激励信号发射。机载频域电磁接收系统包括空心线圈感应传感器、多通道接收机和地面监测站三部分。系统基于 GPS 同步触发,具有低噪声、低功耗、高精度等优势。本次探测选用电动旋翼无人机作为飞行平台,搭载接收机进行信号的连续采集。图 2 为 JL-GAEM 型地空频率域电磁探测系统实物图。

测点施工布置图如图 3 所示,测区实际地空电磁探测面积 1.87 km²,沿南北方向布置测线 124



图 2 JL-GAEM 地空频率域电磁探测系统实物图
Fig. 2 JL-GAEM ground airborne frequency-domain electromagnetic system

条,线距 20 m,点距 10 m,有效物理测点 9 424 点,检查点 608 点,合计总物理测点 10 032 点。

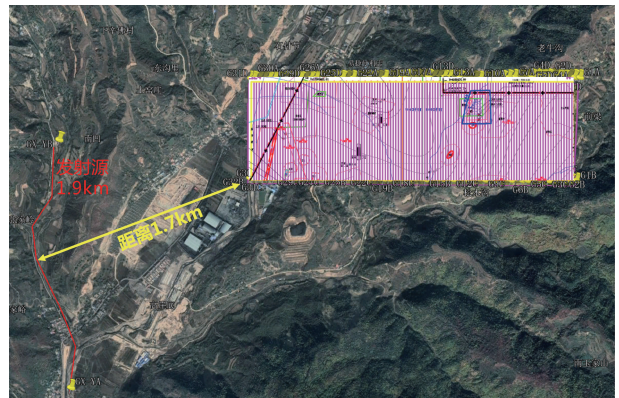


图 3 测网布置示意图

Fig. 3 Schematic diagram of the arrangement of measuring points

根据测区地形以及探测需求,地面布设电性源长度为 1 950 m,发射波形为 80、160、320、640、1 280 Hz 的五频伪随机信号,发射电流 30 A,空中接收线圈等效面积为 2 942 m²,采样频率为 31.25 kHz,具体仪器工作参数如表 1 所示。

表 1 仪器工作参数表

Tab. 1 Instrument performance parameters

性能	参数
电性源长度/m	1 950
发射电流/A	30
接收线圈面积/m ²	2 160
采样频率/kHz	31.25
发射波形	80 Hz 基频(5 频)
最大电压/V	1 200
最大旁测距/m	3 920
无人机航速/(m · s ⁻¹)	5
飞行高度/m	40~80

3.2 电磁探测数据的处理

地空频率域电磁探测数据受空中线圈姿态变化影响,易引入低频地磁场分量及同频发射信号

产生的水平磁场分量,而导致数据质量明显降低。这种现象对于远源接收点影响更明显,因为信号随收发距增大而快速衰减,在远源处信号微弱,姿态噪声会导致数据信噪比明显下降。因此,在数据反演成像之前,需对地空频率域数据进行预处理。地空电磁数据处理流程如图4所示,具体包括以下步骤:

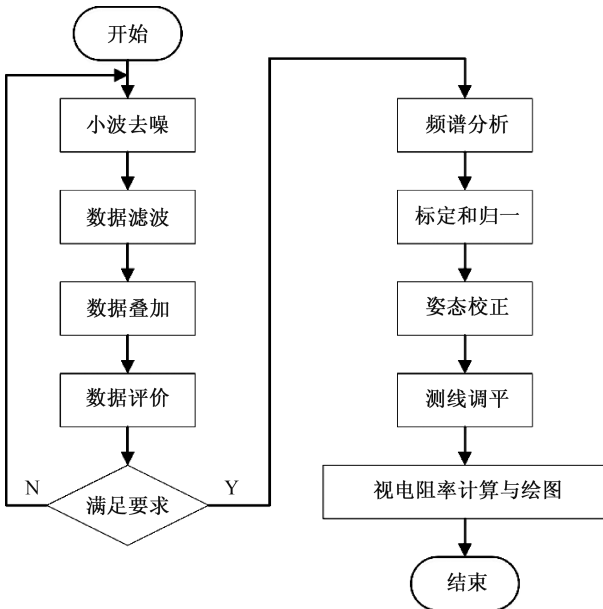


图4 地空电磁数据处理流程图

Fig. 4 Flow chart of ground airborne electromagnetic data processing

(1)小波去噪去除低频基线:针对低频地磁场和线圈低频运动引入的低频噪声,采用小波变换的方法去除低频基线,降低基线漂移在有效信号中产生影响;

(2)滤波:在频谱分析前先对数据进行滤波处理滤除带外噪声,防止数据做截断数据频谱分析时出现泄露现象;

(3)叠加:在采样时间内,对数据进行多周期叠加,去除信号中的非整周期随机噪声;

(4)频谱分析(FFT):将处理后的时间序列进行FFT运算,得到各频点信号的幅度和相位;

(5)标定和归一:对FFT后的数据进行仪器标定和磁传感器标定,得到实测的磁场在各频点处对应的幅度和相位,再对幅度和相位进行电流归一化得到归一化的磁场;

(6)姿态校正:对标定后数据进行姿态校正,通过数据和校正因子去除数据中的同频姿态噪声;

(7)调平:对不同测线,不同测点,不同频率的数据进行空间滑动平均滤波。以实现数据的调

平,保证相邻测线测量一致性。

3.3 视电阻率计算

地空频率域电磁探测方法是通过空中测量单一的垂直磁场分量进而获得地下视电阻率分布的一种方法。考虑视电阻率成像结果存在单一性,成像效率高,对电性结构的相对变化反映灵敏,目前处理手段以视电阻率快速成像方法为主。

均匀半空间模型下,公式(1)可简化为:

$$B_z = \frac{\mu_0 I L}{2\pi} \cdot \frac{y}{R} \int_0^\infty \frac{\lambda^2}{\lambda + \mu} e^{-\lambda z} J_1(\lambda R) d\lambda \quad (2)$$

式中, $\mu = (\lambda^2 - k_1^2)^{\frac{1}{2}}$, $k_1^2 = \mu_1 \varepsilon_1 \omega^2 - i\mu_1 \sigma_1 \omega$, $\omega = 2\pi f$ 。 k_1 为均匀大地的波数, μ_1 、 ε_1 和 σ_1 分别是均匀大地的磁导率、介电常数和电导率, f 为目标频点发射频率。其中视电阻率 $\rho_1(f) = 1/\sigma_1(f)$ 是隐含在公式中的,参照全区视电阻率的概念,通过磁场拟合迭代可获得各点的视电阻率,视深度则有趋肤深度公式定义^[13]。

4 探测结果与分析

为查明测区内小煤窑的采空情况,对124条测线的地空探测信号进行了上述数据处理,得到全测区内地下视电阻率分布,其中重点关注的部分测线纵向剖面结果如图5所示。该组图揭示了测区地下-50 m至-300 m范围内的地电结构分布情况,图例颜色显示了该区域内视电阻率范围为35~140 $\Omega \cdot m$ 。从图中可以看出,重点关注的3条测线内均存在局部相对低阻异常区域,范围分别为:L1线南北方向0~350 m,海拔高度810~930 m范围;L13线南北方向0~350 m,海拔高度800~950 m范围;L49线南北方向350~750 m,海拔高度800~900 m范围;L109线南北方向170~500 m,海拔高度720~770 m范围。低阻带在空间上具备连续贯通性,可能为地下小煤窑的含水采空区发育位置。

结合煤矿地形资料,基于纵向剖面数据,抽取测区内重点关注的10#煤层采掘面视电阻率切片如图6所示。总体来讲,测区内地下视电阻率南北方向连续性较好,东西方向呈现“高一低—高一低—高一”的特征。根据视电阻率分布特征,圈定3处低阻异常D1、D2和D3。其中D1面积较小,分布在测区东南方向。D2面积最大,分布在东西方向1550~1900 m范围内的测区北部。D3分布在东西X方向300~500 m范围测区南侧。

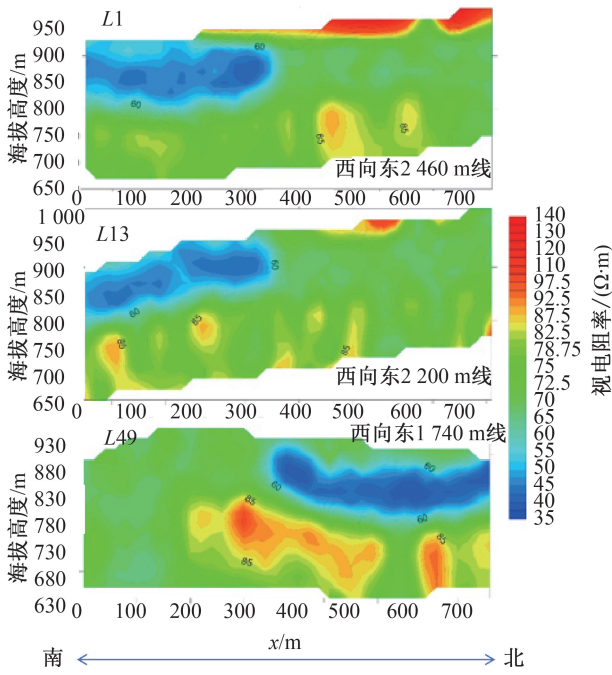


图 5 部分测线视电阻率剖面图

Fig. 5 Apparent resistivity profiles of part lines

采矿区地下视电阻率结构主要受煤层分布和开采情况的影响。为进一步分析可能的地下结构情况,将获得的视电阻率剖面图投影到矿区施工图上,如图 7 所示。由图可知, $D2$ 对应的低阻位置为煤矿 1 号采空积水区(绿色线框位置)。根据早期的抽水实验和采空面积,估计积水量 $2\ 168\ \text{m}^3$ 左右。另外,通过投影对比, $D1$ 和 $D3$ 附近位置均存在采空区,结合低阻特征,推测为可能的含水结构,为后续验证治理工作提供参考。

5 结论

1) 利用地空频率域电磁系统,通过在地面布设电性源、空中无人机采集信号的工作方式,获取了研究区的地空频率域电磁响应数据。

2) 通过对地下 300 m 深度内的视电阻率特征的分析,获取了研究区内地下电性结构的特性,准确圈定了区内疑似煤窑采空积水区的范围。

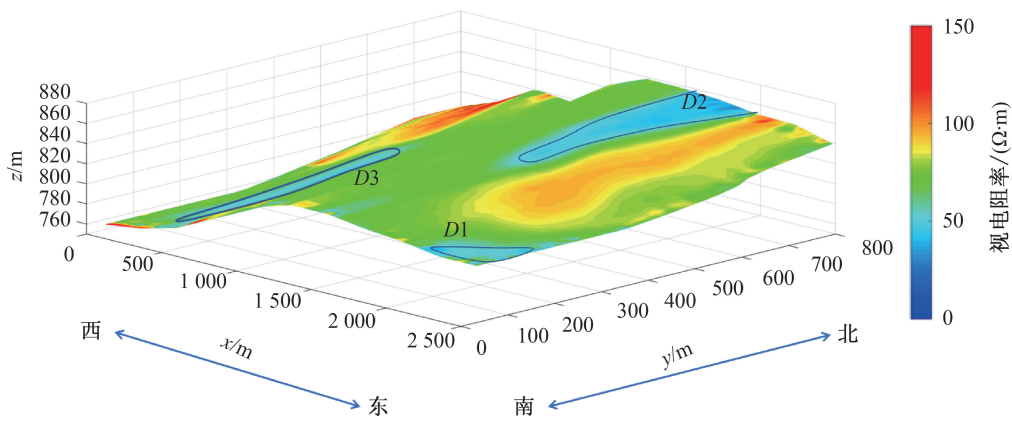


图 6 10#煤层采掘面视电阻率切片

Fig. 6 Apparent resistivity slice of mining face in 10# coal seam

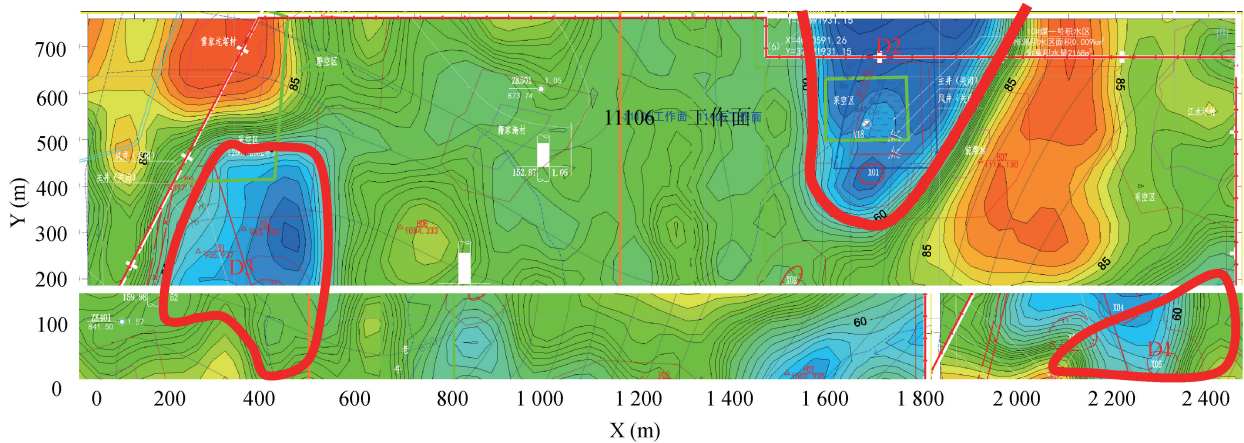


图 7 10#煤层视电阻率平面投影图

Fig. 7 Plan projection of apparent resistivity of 10# coal seam

3)对比实际煤层资料,验证了地空频率域电磁系统在小煤窑勘查应用中的可行性与高效性,为地层结构分析以及煤矿水害防治提供了有效的指导信息。

目前地空电磁数据的反演方法尚处于研究阶段,缺少成熟反演软件。在未来工作中,将针对采空积水区模型快速正演和反演方法开展详细研究,对于重点区域,利用反演手段进一步处理,提升解释精度。

参考文献:

- [1]程建远,石显新.中国煤炭物探技术的现状与发展[J].地球物理学进展,2013,28(4):2024-2032.
- [2]滕吉文,张雪梅,杨辉.中国主体能源——煤炭的第二深度空间勘探、开发和高效利用[J].地球物理学进展,2008,23(4):972-992.
- [3]李连济.我国煤炭城市采空塌陷灾害及防治对策研究[R].太原:山西省社会科学院,2004.
- [4]张俊英,王翰锋,张彬,等.煤矿采空区勘查与安全隐患综合治理技术[J].煤炭科学技术,2013,41(10):76-80.
- [5]刘宗燕,纪洪广.采空区顶板垮落造成的冲击性灾害预测[J].西部探矿工程,2007,19(3):101-102.
- [6]张庆辉,田忠斌,林君,等.时域电性源地空电磁系统在煤炭采空积水区勘查中的应用[J].煤炭学报,2019,44(8):2509-2515.
- [7]王振荣,程久龙,宋立兵,等.地空时间域电磁系统在陕西神木地区煤矿采空区勘查中的应用[J].地球科学与环境学报,2020,42(6):8.
- [8]侯彦威,高小伟,李雄伟,等.地空瞬变电磁在积水采空区探测中的应用[J].煤炭工程,2021,53(10):6.
- [9]ELLIOTT P. The Principles and Practice of FLAIRTEM[J]. Exploration Geophysics,1998,29(2):58-60.
- [10]MOGI T, TANAKA Y, KUSUNOKI K, et al. Development of Grounded Electrical Source Airborne Transient EM (GREATEM)[J]. Exploration Geophysics,1998,29:61-64.
- [11]SMITH R S, ANNAN P, MC GOWAN P D. A Comparison of Data from Airborne, Semi-airborne, and Ground Electromagnetic Systems[J]. Geophysics,2001,66(5):1379-1385.
- [12]周海根.多场源地空频率域电磁探测方法研究[D].长春:吉林大学,2017.
- [13]李辉,杨曦,刘跃成,等.地空协同时频域电磁探测技术在深埋长隧道地质勘察中的应用研究[J].公路交通科技:应用技术版,2019,15(7):277-279.
- [14]张政杰.金谷煤矿一采区采空积水区分布研究[D].邯郸:河北工程大学,2015.
- [15]郭培鹏.瞬变电磁超前探测技术在山西金谷煤矿中的应用[J].煤炭与化工,2015,38(2):94-95.
- [16]LIN J, KANG L, LIU C, et al. The Frequency-domain Airborne Electromagnetic Method with a Grounded Electrical Source[J]. Geophysics,2019,84(4):E269-E280.
- [17]刘长胜,朱文杰,马金发,等.地空频率域电磁法探测范围与深度分析[J].中国矿业大学学报,2020,49(5):1006-1012.

(责任编辑 王利君)